

**А.Ю.БОНДАРЕНКО****ПЛОСКИЙ ИНДУКТОР С ДВУМЯ ИСТОЧНИКАМИ ПИТАНИЯ  
ДЛЯ МАГНИТНО-ИМПУЛЬСНОГО ПРИТЯЖЕНИЯ УЧАСТКА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛИСТА**

Проведен анализ распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля с двух сторон плоского металлического немагнитного листа при воздействии на него поля индуктора, включенного в разрядные цепи двух разночастотных магнитно-импульсных установок. Токи в индукторе имеют взаимно противоположное направление. Проанализировано влияние параметров разрядных токов на величину распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку, результаты позволяют сделать оптимальный выбор для получения максимальной величины сил притяжения в данной конструкции индуктора.

**Ключевые слова:** магнитно-импульсная установка, разрядный ток, напряженность магнитного поля, плоский металлический лист, силы притяжения, амплитудно-временные параметры.

**О.Ю. БОНДАРЕНКО****ПЛОСКИЙ ИНДУКТОР З ДВОМА ДЖЕРЕЛАМИ ЖИВЛЕННЯ  
ДЛЯ МАГНІТНО-ІМПУЛЬСНОГО ТЯЖІННЯ ДІЛЯНКИ МЕТАЛЕВОГО ЛИСТА**

Проведен аналіз розподілу дотичної компоненти напруженості магнітного поля з двох сторін плоского металевого немагнітного листа при дії на нього поля індуктора, увімкненого в розрядні ланцюги двох різночастотних магнітно-імпульсних установок. Струми в індукторі мають взаємно протилежний напрям. Проаналізовано вплив параметрів розрядних струмів на величину розподілених сил тяжіння–відштовхування, що діють на листову заготовку, результати дозволяють зробити оптимальний вибір для отримання максимальної величини сил тяжіння в цій конструкції індуктора.

**Ключові слова:** магнітно-імпульсна установка, розрядний струм, напруженість магнітного поля, плоский металевий лист, сили тяжіння, амплітудно-часові параметри.

**A.YU. BONDARENKO****THE PLANE INDUCTOR WITH TWO POWER SOURCES  
FOR MAGNETIC–PULSE ATTRACTION OF AREA METAL SHEET**

The theoretical analysis of a magnetic field intensity tangent component distribution from the both sides of a flat metal nonmagnetic sheet is carried out, one side of the sheet exposed to magnetic field of the flat inductor. The inductor is connected to discharge circuits of two magnetic-pulse plants. The frequency of the first plant discharge circuit is a few kilohertz, while that of the other plant discharge circuit is about dozens of kilohertz. The inductor currents are mutually opposite. Densities of surface currents in the inductor have uniform distribution. The discharge currents in the inductor create both attractive forces and repulsion forces that act on the metal sheet. The influence of the amplitude-time parameters of the discharge currents on the magnitude of the attractive forces and repulsion forces is analyzed.

**Keywords:** magnetic-pulse plant, discharge current, tension of magnetic-field, flat metallic sheet, attractive powers, amplitude-temporal parameters.

**Введение.** С шестидесятых годов прошлого столетия на предприятиях машиностроительной, авиационной, электротехнической промышленности стала внедряться магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ). Основной технологией обработки МИОМ являлась схема, в которой действующие на обрабатываемую заготовку силы, направлены от индуктора к поверхности заготовки. К такой технологии относятся следующие операции МИОМ: обжим и раздача цилиндрических заготовок, листовая штамповка плоских заготовок [1]. В настоящее время, в соответствии с требованиями производства, стала применяться технология МИОМ, при которой пондеромоторные силы имеют диаметрально противоположное направление, а именно, направлены от поверхности заготовки к индуктору, т.е. имеет место притяжение обрабатываемой заготовки к индуктору. Такая технология МИОМ мо-

жет использоваться для расширения труб малого диаметра [2], т.к. нет возможности применить внутренний индуктор для раздачи трубы, для обработки закрытых металлических сосудов, основное применение: рихтовка вмятин на корпусах летательных аппаратов и автомобилей внешним индуктором [3,4,5]. Операция притяжения участка заготовки к индуктору требует более сложного оборудования, чем классическая технология МИОМ, и может осуществляться разными способами [3], один из которых, заключается в создании с помощью схемных решений и индукторных систем импульсного магнитного поля, воздействующего на заготовку, с пологим фронтом и резким спадом [6]. Для создания импульса такой формы может быть использована двухчастотная схема магнитно-импульсной установки (МИУ), в которой индукторная система состоит из двух катушек, каждая подключена

к своей МИУ. На одну катушку (индуктор) разряжается МИУ, разрядный ток которой имеет высокую частоту порядка нескольких десятков килогерц, а вторая включена в разрядную цепь МИУ с низкой частотой порядка единиц килогерц. Такая схема позволяет получить импульс магнитного поля с пологим фронтом, при этом поле проникает сквозь заготовку, и резким спадом напряженности при достижении максимального значения. Это достигается включением в определенный момент времени второй катушки, через которую протекает ток высокой частоты, а создаваемое им поле направлено противоположно по отношению к «медленному» полю первой катушки. Суперпозиция этих полей приводит к тому, что над обрабатываемой заготовкой напряженность магнитного поля резко падает, в то время, как с обратной стороны заготовки «медленное» поле остается практически неизменным. В определенный временной интервал на заготовку будет действовать сила притяжения, направленная к индукторам. Принцип действия этой схемы с подробным математическим анализом процессов представлен в работе [7].

На практике изготовление и применение индукторной системы, состоящей из двух катушек представляет определенные трудности. Для упрощения конструкции индуктора при использовании двух МИУ с разной частотой разрядного контура можно использовать одну катушку, в которой будет происходить суперпозиция токов двух МИУ.

**Цель работы.** Получение амплитудно-временных зависимостей для расчета распределенных сил притяжения-отталкивания, возникающих в плоской индукторной системе и действующих на листовую металлическую немагнитную заготовку, при разряде на индуктор низко- и высокочастотной МИУ.

**Основная часть.** Схематически, плоский индуктор, с внешним радиусом  $R_2$  и внутренним  $R_1$ , расположенный на расстоянии  $h$  от обрабатываемой заготовки, толщиной  $d$  и удельной электропроводностью металла  $\gamma$ , и включенный в разрядные цепи двух МИУ, представлен на рис. 1. Начало цилиндрической системы координат находится на поверхности заготовки под центром витка индуктора, ось  $z$  перпендикулярна плоскости заготовки и направлена в сторону индуктора.

Расчет электромагнитных процессов проведен в два этапа в приближении заданных разрядных токов МИУ, протекающих в индукторе, которые определяются параметрами разрядных контуров, а поверхностная плотность их в индукторе распределена равномерно [7]. Результирующее магнитное поле в системе находится суперпозицией полей, создаваемых разрядными токами двух МИУ, протекающими в индукторе.

Уравнения Максвелла для возбуждаемых в системе составляющих вектора электромагнитного поля, преобразованных по Лапласу с учетом нулевых начальных условий, имеют вид:

$$\frac{\partial H_r(p, r, z)}{\partial z} - \frac{\partial H_z(p, r, z)}{\partial r} = j_\phi(p, r, z); \quad (1)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\phi(p, r, z)) = -\mu_0 p H_z(p, r, z); \quad (2)$$

$$\frac{\partial E_\phi(p, r, z)}{\partial z} = \mu_0 p H_r(p, r, z), \quad (3)$$

где  $p$  – параметр преобразования Лапласа;  $j_\phi(p, r, z)$  – плотность стороннего тока в катушке;

$$j_\phi(p, r, z) = j(p) \cdot (\eta(r - R_1) - \eta(r - R_2)) \cdot \delta(z - h);$$

$$j(p) = \frac{I(p) \cdot w}{(R_2 - R_1)} [8]; \quad I(p) = L\{I(t)\};$$

$$E_\phi(p, r, z) = L\{E_\phi(t, r, z)\}; \quad H_{r,z}(p, r, z) = L\{H_{r,z}(t, r, z)\};$$

$\eta(r)$  и  $\delta(z)$  – ступенчатая и импульсная функции, соответственно [9].

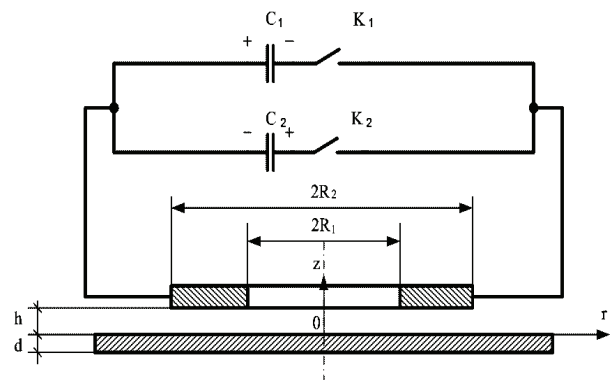


Рисунок 1 – Расчетная схема плоской индукторной системы с двумя источниками питания

Из дифференциальных уравнений – (1) – (3) с учетом принятых допущений можно получить уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля –  $E_\phi(p, r, z)$  в трех областях: над листовой заготовкой,  $z \geq 0$ , в металле заготовки,  $z \in [-d, 0]$ , под листовой заготовкой,  $z \leq -d$ . Условие ограниченности радиального распределения  $E_\phi(p, r, z)$  при  $r = 0$  и  $r = \infty$  удовлетворяет интегральное преобразование Фурье-Бесселя [9].

После применения интегрального преобразования Фурье-Бесселя уравнения для азимутальной компоненты напряженности электрического поля в трех рассматриваемых областях приводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка. Подробное решение вышеуказанных уравнений приведено в работе автора [7]. Окончательные выражения для расчета пространственно-временного распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля на поверхностях обрабатываемой плоской листовой заготовки имеют вид:

– для низкочастотной МИУ

а) над листом

$$H_1(t, r, z = 0) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^\infty \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (3)$$

б) под листом

$$H_1(t, r, z = -d) \approx \frac{-j_1(t)}{2} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times \frac{e^{-\lambda(h+d)}}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (4)$$

– для высокочастотной МИУ

а) над листом

$$H_2(t, r, z = 0) \approx -j_2(t) \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times \frac{e^{-\lambda h}}{\lambda} J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (5)$$

б) под листом

$$H_2(t, r, z = -d) \approx \frac{-\int_0^t j_2(\tau) d\tau}{(\mu_0 \gamma d)} \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{(\lambda R_1)}^{(\lambda R_2)} x J_1(x) dx \right] \times \\ \times e^{-\lambda h} \cdot J_1(\lambda r) d\lambda, \quad (6)$$

где  $j_{1,2}(t)$  – поверхностная плотность тока в катушке от низко- и высокочастотной МИУ [8],

$j_{1,2}(t) = \frac{I_{1,2}(t)w}{(R_2 - R_1)}$ ,  $I_{1,2}(t)$  и  $w$  – разрядный ток низко- и высокочастотной МИУ, и число витков в катушке, соответственно.

Из выражений (3), (5) получим суммарную напряженность магнитного поля на внутренней поверхности плоской заготовки (поверхность со стороны индуктора).

$$H_{\text{вн}}(t, r, z = 0) = 0,5 \cdot j_{\text{max}} \cdot G_1(\varphi) \cdot \Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right), \quad (7)$$

где  $G_1(\varphi)$  – временная функция результирующего поля,  $\varphi = 2\pi f_1 t = \omega_1 t$ ,  $f_1$  – частота разрядного тока низкочастотной МИУ.

$$G_1(\varphi) = e^{-\delta_1 \varphi} \cdot \sin(\varphi) - A \cdot e^{-\delta_1 \frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)} \times \\ \times \sin\left(\left(\frac{f_2}{f_1}\right) \cdot (\varphi - \varphi_0)\right); \\ A = \frac{j_{2\text{max}}}{j_{1\text{max}}}; \quad \varphi_0 \approx \frac{\pi}{2},$$

$\delta_1$  – относительный декремент затухания,  $\Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right)$  –

функция пространственного распределения

$$\Phi_1\left(\frac{r}{R_2}\right) = \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{R_1}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) dx \right] \cdot \frac{e^{-y \frac{h}{R_2}}}{y} \cdot J_1\left(y \frac{r}{R_2}\right) dy.$$

Напряженность результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки находим с помощью выражений (4), (6):

$$H_{\text{нар}}(t, r, z = -d) = 0,5 \cdot j_{1\text{max}} \cdot \left( G_2(\varphi) \cdot \Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right) - \right. \\ \left. - G_3(\varphi) \cdot \Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right) \right), \quad (8)$$

где  $G_{2,3}(\varphi)$  – временные функции,  $\varphi$  – фаза возбуждаемого низкочастотного поля,

$$G_2(\varphi) = e^{-\delta_1 \varphi} \cdot \sin(\varphi);$$

$$G_3(\varphi) = \frac{A}{1 + \delta_2^2} - \frac{A}{1 + \delta_2^2} \cdot e^{-\delta_2 \frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)} \times \\ \times \left[ \delta_2 \cdot \sin\left(\frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)\right) + \cos\left(\frac{f_2}{f_1} (\varphi - \varphi_0)\right) \right];$$

$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right)$ ,  $\Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right)$  – функции пространственного распределения,

$$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right) = \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{R_1}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times \frac{e^{-y \frac{h+d}{R_2}}}{y} \cdot J_1\left(y \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot dy;$$

$$\Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right) = \left( \frac{\Delta^2}{d \cdot R_2} \right) \cdot \int_0^{\infty} \left[ \int_{\frac{R_1}{R_2}}^y x \cdot J_1(x) \cdot dx \right] \times$$

$$\times e^{-y \frac{h}{R_2}} \cdot J_1\left(y \cdot \frac{r}{R_2}\right) \cdot dy;$$

$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega_2 \cdot \mu_0 \cdot \gamma}}$  – глубина проникновения высокочастотного поля в металл заготовки.

В качестве примера, рассмотрим применение полученных теоретических результатов для расчета электромагнитных и электродинамических процессов в индукторной системе, эскиз которой представлен на рис. 1. Геометрия индукторной системы следующая:  $R_1 = 0,025$  м,  $R_2 = 0,063$  м,  $h = 0,003$  м. Обрабатываемый стальной лист имеет толщину  $d = 0,0008$  м, удельная электропроводность которого равна  $\gamma = 0,6 \cdot 10^7$  1/Ом·м. На вход индукторной системы подаются токовые импульсы от двух МИУ, временные зависимости которых функционально одинаковы и представляют собой экспоненциально затухающие синусоиды:

$$j_{1,2}(t) = j_{1,2\text{max}} \cdot e^{-\delta_{1,2}(\omega_{1,2} t)} \cdot \sin(\omega_{1,2} \cdot t).$$

Индекс «1» относится к низкочастотному разрядному току, а «2» – к высокочастотному. Относительные декременты затухания у обоих импульсов одинаковы  $\delta_{1,2} = 0,2$ . рабочая частота низкочастотного импульса  $f_1 = 2,2$  кГц, высоко-частотного –  $f_2 = 30$  кГц, моменты включения импульсов смещены на величину  $\Delta t \approx \pi/(2 \cdot \omega_1)$ , отношение амплитуд плотностей токов в индукторе  $A = 1$ .

Найдем пространственно-временное распределение касательной компоненты напряженности магнитного поля на поверхностях обрабатываемого листа,

временной характер взаимодействия возбуждаемых полей, пространственные зоны максимального электродинамического воздействия на обрабатываемый лист.

На рис.2 представлено временное (рис. 2, а) и пространственное (рис. 2, б) распределение касательной составляющей напряженности результирующего магнитного поля на внутренней поверхности металлического листа.

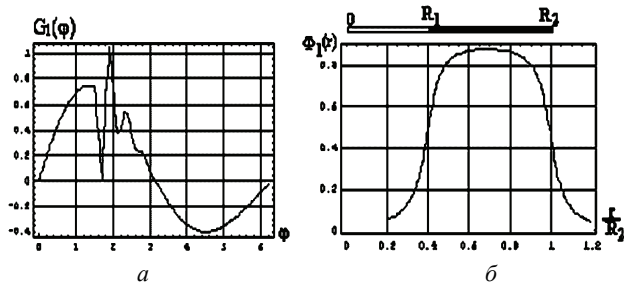


Рисунок 2 – Распределение касательной составляющей напряженности результирующего магнитного поля на внутренней поверхности металлического листа:

а – временное; б – пространственное

Из приведенного рисунка видно, что зона практически однородного поля находится в интервале  $r/R_2 = 0,5 \pm 0,9$ .

Графики на рис. 3 иллюстрируют диффузионные процессы в листовой заготовке. На рис. 3 представлены временные зависимости магнитных полей, проникших сквозь листовую заготовку на ее внешней поверхности: рис. 3, а – низкочастотная составляющая, рис. 3, б – высокочастотная составляющая, рис. 3, в – функция результирующего поля в центре рабочей зоны  $r = 0,5(R_1 + R_2)$ .

Результат анализа графиков на рис. 3 показывает, что высокочастотная составляющая вносит незначительный вклад в формирование результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки. Временная функция результирующего поля формируется, в основном, низкочастотным сигналом (рис. 3, в). Вклад высокочастотной составляющей приводит к незначительному искажению кривой во временном интервале, соответствующем включению высокочастотного импульса в индукторе.

Результаты численной реализации выражений

$$\Phi_2\left(\frac{r}{R_2}\right), \quad \Phi_3\left(\frac{r}{R_2}\right)$$

представлено пространственное распределение амплитудных значений касательной компоненты напряженности магнитного поля на внешней поверхности металлического листа: рис. 4, а – низкочастотная составляющая, рис. 4, б – высокочастотная составляющая, рис. 4, в – результирующее поле в момент времени соответствующий максимуму высокочастотной составляющей  $\varphi = 1,8$ .

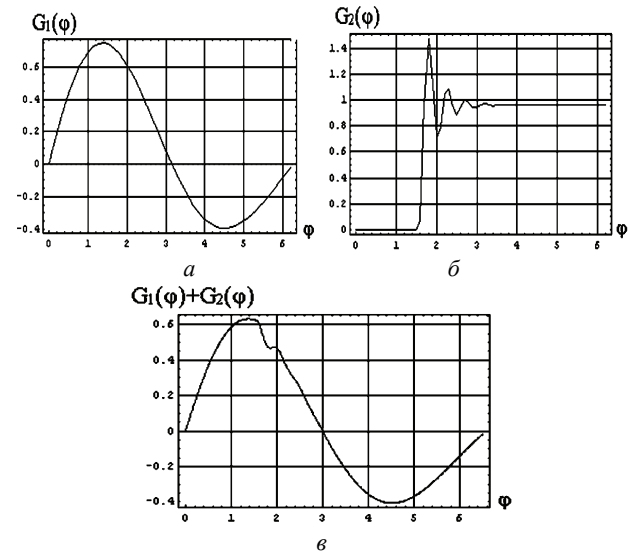


Рисунок 3 – Временные зависимости магнитных полей, проникших сквозь листовую заготовку на ее внешней поверхности:

а – низкочастотная составляющая; б – высокочастотная составляющая; в – функция результирующего поля в центре рабочей зоны  $r = 0,5(R_1 + R_2)$

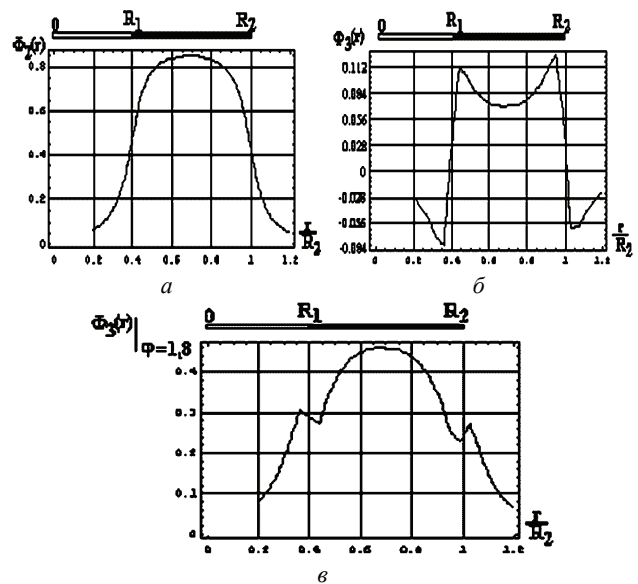


Рисунок 4 – Пространственное распределение амплитудных значений касательной компоненты напряженности магнитного поля на внешней поверхности металлического листа: а – низкочастотная составляющая; б – высокочастотная составляющая; в – результирующее поле в момент времени соответствующий максимуму высокочастотной составляющей  $\varphi = 1,8$

Результатом анализа проведенных расчетов является вывод о том, что в рассматриваемом варианте индукторной системы вклад высокочастотной составляющей в формирование результирующего поля на внешней поверхности листовой заготовки незначителен. Приблизительно это можно оценить величиной амплитуды функции пространственного распределения высокочастотного поля, проникшего сквозь заготовку  $\Delta^2/(d \cdot R_2) \approx 0,0279 \ll 1$ .

Проанализируем временные процессы притяже-

ния–отталкивания листовой заготовки к индуктору при воздействии магнитных полей с принятыми параметрами. На рис. 5 приведена временная функция распределенной силы, действующей на заготовку в центре рабочей зоны, которая определяется из выражения  $F(\varphi) \sim H_{нар}^2 - H_{вн}^2$ . При  $F(\varphi) > 0$  происходит притяжение заготовки к индуктору, при  $F(\varphi) < 0$  меньше нуля – отталкивание. Полностью, величина распределенной силы, действующей на листовую заготовку, определяется выражением:

$$P(\varphi) \approx \frac{\mu_0}{8} \cdot \left( \frac{I_{\max}}{R_2 - R_1} \right) \cdot F(\varphi), \quad (9)$$

где  $I_{\max}$  – амплитуда тока в индукторе.

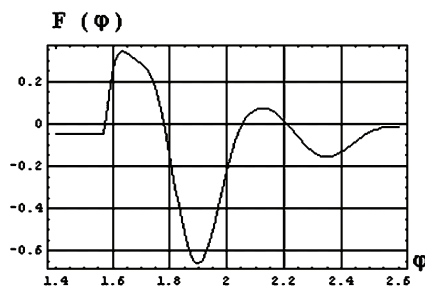


Рисунок 5 – Временная зависимость распределенной силы, действующей на листовую заготовку в центре рабочей зоны

Из рис. 5 видно, что при принятом режиме работы двухчастотной МИУ, на листовую заготовку будет действовать сила притяжения, первый максимум которой соответствует моменту подавления низкочастотного поля над заготовкой, отрицательной по отношению к нему, полувольтной высокочастотного поля (см. рис. 2, а). На заготовку будет действовать и сила отталкивания. Ее первый максимум соответствует второй полувольтной высокочастотного поля, положительной по отношению к низкочастотной составляющей (см. рис. 2, а). Отношение амплитуды распределенной силы притяжения к амплитуде распределенной силы отталкивания заготовки к индуктору в данном случае равно  $K \approx 0,7$ . Следовательно, для обеспечения работоспособности рассмотренной индукторной системы необходимо уменьшить возбуждаемые силы отталкивания, что возможно сделать выбором другого амплитудно-временного режима работы индукторной системы.

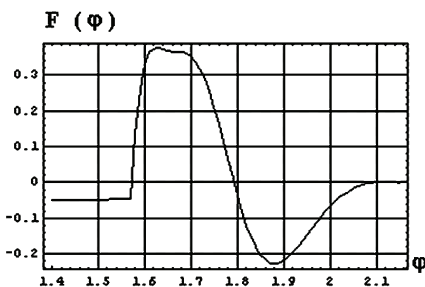


Рисунок 6 – Временная зависимость распределенной силы притяжения–отталкивания, действующей на листовую заготовку при следующих параметрах разрядных токов:  $f_1 = 2,2$  кГц;  $\delta_1 = 0,2$ ;  $f_2 = 30$  кГц;  $\delta_2 = 0,5$ ;  $A = 1,5$

Используя полученные формулы, проведены расчеты сил притяжения–отталкивания для других амплитудно-временных параметров разрядных импульсов МИУ. На рис. 6 приведена временная зависимость распределенной силы притяжения–отталкивания, действующей в рассматриваемой индукторной системе на листовую заготовку при следующих параметрах разрядных токов:  $f_1 = 2,2$  кГц;  $\delta_1 = 0,2$ ;  $f_2 = 30$  кГц;  $\delta_2 = 0,5$ ;  $A = 1,5$ .

В табл. 1 приведены результаты расчетов отношения амплитуд распределенных сил притяжения к силам отталкивания, действующим на листовую заготовку при различных амплитудно-временных параметрах разрядных токов МИУ. Обозначения величин в таблице такие же, как в тексте.

Таблица 1

$f_1$ , кГц	$\delta_1$	$f_2$ , кГц	$\delta_2$	$A$	$K$
2,2	0,2	20	0,5	1,5	1,9
2,2	0,2	10	0,5	1,3	3,4
2,2	0,2	7	0,5	1,3	6
2,2	0,2	5	0,5	1,3	28

Результаты вычислений, приведенные в табл. 1, показывают, что уменьшение частоты высокочастотного разрядного тока при определенном выборе амплитуды и относительного декремента затухания приводит к снижению амплитуд сил отталкивания. Однако, понижение частоты приводит к росту значимости диффузионных эффектов, что, в свою очередь, снижает эффективность силового воздействия на заготовку в целом. Для нивелирования диффузионных эффектов требуются соответствующие конструкционные и схемные решения, при которых в индукторной системе высокочастотная составляющая в максимально возможной степени представляла плоскопараллельное магнитное поле.

### Выводы.

1. Получены аналитические выражения распределения касательной компоненты напряженности магнитного поля с двух сторон плоского металлического немагнитного листа при воздействии на него поля индуктора, включенного в разрядные цепи двух разночастотных МИУ, а также выражения для расчета распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку.

2. Показано влияние амплитудно-временных параметров разрядных токов двух МИУ на величину распределенных сил притяжения–отталкивания, действующих на листовую заготовку.

3. Результаты расчетов позволяют производить оптимальных подбор амплитудно-временных параметров разрядных токов для получения максимального эффекта притяжения участка листовой заготовки к индуктору.

### Список литературы:

1. Белый И.В. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов / И.В. Белый, С.М. Фертник, Л.Т. Хименко. –

Х.: Вища школа, 1977. – 168 с.

2. Щеглов Б.А. Раздача тонкостенных трубчатых заготовок силами притяжения импульсного магнитного поля / Б.А. Щеглов, А.А. Есин // Кузнечно-штамповочное производство. – 1971. – № 4. – С. 15-18.
3. Батыгин Ю.В. Инструмент для магнитно-импульсного притяжения листовых заготовок / Ю.В. Батыгин, В.И. Лавинский, А.Ю. Бондаренко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 11 (47). – С. 44-51.
4. Бондаренко А.Ю. Инструмент для магнитно-импульсной рихтовки вмятин в металлических покрытиях автомобильных кузовов / А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Е.Ф. Еремина // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». – Луцьк, 2014. – Вип. № 44. – С. 11-17.
5. Бондаренко А.Ю. Внешняя рихтовка кузовов автотранспорта с помощью электродинамических систем при прямом пропускании импульсного тока / А.Ю. Бондаренко, В.Б. Финкельштейн, Т.В. Гаврилова // Вісник НТУ «ХПІ». Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – 2014. – № 9 (1052). – С. 66-72.
6. Шнеерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверх сильных токов / Г.А. Шнеерсон. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 416 с.
7. Бондаренко А.Ю. Электромагнитные процессы в плоской индукторной системе с двумя катушками при равномерном распределении в них поверхностных токов / А.Ю. Бондаренко // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – № 3. – С. 61-65.
8. Дзенитис О.Я. Расчет распределения поля плоской катушки вблизи полубесконечной проводящей среды с учетом переходного процесса / О.Я. Дзенитис, З.И. Бандер // Изв. АН Латв. ССР. Сер. физ. и техн. наук. – 1971. – № 6. – С. 78-87.
9. Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. – М.: Атомиздат, 1972. – 392 с.

#### References (transliterated):

1. Belyj I.V., Fertik S.M., Himenko L.T. Spravochnik po magnitno-impul'snoj obrabotke metallov [Handbook on magnetic pulse processing of metals]. Kharkiv: Vyshha shkola. Publ. 1977. 168 p.
2. Shheglov B.A., Esin A.A. Razdacha tonkostennyh trubchatyh zagotovok silami pritjazhenija impul'snogo magnitnogo polja [The distribution of thin-walled tubular billets by the forces of

attraction of a pulsed magnetic field]. Kuznechno-shtampovочное proizvodstvo [Forging-stamping production], 1971. No.4. P. 15-18.

3. Batygin Ju.V., Lavinskij V.I., Bondarenko A.Ju. Instrument dlja magnitno-impul'snogo pritjazhenija listovyh zagotovok [Tool for magnetic-impulse attracting of sheet blanks] Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija [Aerospace engineering and technology], 2007. No. 11 (47). P. 44-51.
4. Bondarenko A.Ju., Finkel'shtejn V.B., Eremina E.F. Instrument dlja magnitno-impul'snoj rihtovki vmjatin v metallicheskih pokrytijah avtomobil'nyh kuzovov [Tool for magnetic-impulse leveling of dents in metal coatings of automotive bodies]. Mizhvuzivs'kij zbirnik «Naukovi notatki» [Intercollegiate collection "Scientific Notes"]. Luc'k, 2014. No. 44. P. 11-17.
5. Bondarenko A.Ju., Finkel'shtejn V.B., Gavrilova T.V. Vneshnja rihtovka kuzovov avtotransporta s pomoshh'ju jelektrodinamicheskijh sistem pri prjamom propuskannij impul'snogo toka [External leveling of car bodies using electrodynamic systems with direct transmission of pulsed current]. Visnik NTU «KhPI». Ser.: Avtomobile- ta traktorobuduvannja [Automobile and tractor construction]. Kharkiv NTU «KhPI», 2014. No. 9 (1052). P. 66-72.
6. Shneerson G.A. Polja i perehodnye processy v apparature sverh sil'nyh tokov [Fields and transients process in apparatus of excess of strong currents]. 2-e izd., pererab. i dop. Moskow: Jenergoatomizdat. Publ. 1992. 416 p.
7. Bondarenko A.Ju. Jelektromagnitnye processy v ploskoj induktornoj sisteme s dvumja katushkami pri ravnomernom raspredelenii v nih poverhnostnyh tokov [Electromagnetic processes in a flat inductor system with two coils under uniform surface currents distribution in the coils]. Elektrotehnika i elektromehanika [Ectrotechnics and Electromechanics], 2012. No. 3. P. 61-65.
8. Dzenitis O.Ja., Bander Z.I. Raschjot raspredelenija polja ploskoj katushki vblizi polubeskonechnoj provodjashhej sredy s uchjotom perehodnogo processa [Calculation of the distribution of the field of a flat coil near a semi-infinite conducting medium, taking into account the transient process]. Izv. AN Latv. SSR. Ser. fiz. i tehn. nauk, 1971. No.6. P. 78-87.
9. Mjet'juz Dzh., Uoker R. Matematicheskie metody fiziki [Mathematical methods of physics]. Moskow: Atomizdat. Publ. 1972. 392 p.

Поступила (received) 30.03.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бондаренко Олександр Юрійович (Бондаренко Александр Юрьевич, Bondarenko Aleksandr Yurevich)** – кандидат технічних наук, доцент, НТУ «ХПІ»; тел.: (057)7076245; e-mail: abondarenko51@gmail.com.